引用格式：王孟，李卫东. 基于万物互联网的泛在操作系统开源生态构建方法研究. 中国科学院院刊, 2023, 38(4): 632-642

Wang M, Li W D. Research on construction method of ubiquitous operating system open source ecosystem based on Internet of Everything. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(4): 632-642

基于万物互联网的泛在操作系统开源生态构建方法研究

王　孟　李卫东*

华中科技大学 新闻与信息传播学院 武汉 430074

摘要　构建自主可控、健康可持续的开源生态是泛在操作系统发展与应用的关键一环。针对万物互联网环境，结合泛在操作系统的新特性，文章总结出泛在操作系统开源生态的构成要素和系统模型，提出泛在操作系统开源生态的构建方法。文章探索泛在操作系统开源生态的构成要素、基础平台和持续健康演化的方法与机制，为推进泛在操作系统的迭代创新，打破泛在操作系统开源生态“孤岛”，促进泛在操作系统开源生态的初步实践、协同发展提供新思路、探索新途径。

关键词　万物互联网，泛在操作系统，开源生态，构建方法

万物互联时代，软件在信息化社会中扮演了重要角色；而操作系统作为软件运行的基础性平台，其重要性更是不言而喻。操作系统不仅是计算机系统的核心，也是计算机产业发展的基石，更是信息安全的重要保障。随着信息技术环境的变化和新型应用模式的出现，操作系统也在不断演化和升级[1]。当前，物理世界、现实世界和信息世界进行强烈的交互，计算无时不在、无处不在，互联网革命进入“下半场”，一个海量对象相互连接而成的万物互联时代正在开启，操作系统发展的新蓝海已然出现[2]。为了更好地管理海量、异质、异构、自主的泛在资源，应对新应用和新场景带来的挑战，泛在操作系统应运而生。

在泛在操作系统的比拼中，功能、技术是一方面，更重要的是，以开源为契机建立的生态。我国泛在操作系统开源生态建设处于起步阶段，呈迅猛发展趋势，但当前存在的国内外差距巨大[3]、参与者积极性不高[4]、组织松散且管理力度不足[5]、生态不成熟且碎片化严重[6]等问题造成我国开源生态建设面临诸

*通信作者

资助项目：国家社会科学基金重大项目（22ZDA078）

修改稿收到日期：2023年3月31日

多障碍，开源生态的价值和作用尚未得到充分发挥。这些矛盾现象充分说明，我国急需探究和采用有效方法，打破泛在操作系统开源生态“孤岛”，构建我国泛在操作系统开源生态，保障泛在操作系统开源生态持续健康运行。

1 泛在操作系统开源生态相关研究背景与发展现状

作为一项正在起步的新型技术，泛在操作系统要想蓬勃发展，开源必不可少[7]。① 面向多样性应用模式的泛在操作系统需要开源。开源已经成为软件技术创新、产品迭代演化的关键要素，也是强化信息产业基础、驱动信息产业变革的重要组织模式[8]。因此，只有通过开源，才能集成更多的数据、技术与知识，从而实现对泛在操作系统整体性和系统性的认识。② 开源有利于共享前沿技术红利，激活泛在操作系统创新生态。随着“人-机-物”融合发展，泛在操作系统开源有利于接入更多的终端设备，连接各种场景应用和海量数据，让更多的企业和开发者更方便地享受泛在操作系统发展红利，助力千行百业。开源在中国虽已有20年的发展，但开源项目集中在程序开发与万维网（Web）应用开发领域，在操作系统领域项目相对较少，缺乏开源生态的理论和构建研究。开源在推动操作系统技术创新，构建可信协作模式的重要价值上未被人们所认知。

学术界和企业界对泛在操作系统开源的关注点不仅在于泛在操作系统开源本身，还涉及整个开源生态系统。事实上，关于开源软件生态构建的研究很早就被关注。但目前研究主要关注开源软件的生态构建问题，鲜有学者专门研究泛在操作系统开源生态。随着泛在操作系统应用领域多样化和设备专用性突出，有必要将泛在操作系统开源视为一个单独的开源生态。目前大多数研究是在一个理想的环境中解决特定问题[9-11]；但由于这些研究相互分散和孤立，很难应用和推广这些方法。要更好地构建泛在操作系统开源生态，必须基于当前的技术环境，针对新特性和新问题创新生态构建方法。万物互联网作为一种崭新的信息技术生态环境已经渗透进各行各业，连接对象更为广泛，能与人和社会环境进行强烈的交互[12]。而万物互联接入的全场景海量终端设备，其协同开发尚属空白。如何帮助开发者打通不同设备间的壁垒，实现跨终端的生态共享与协同，是泛在操作系统开源的关键挑战。

2 泛在操作系统开源生态

2.1 泛在操作系统开源生态概念阐释

泛在操作系统特指秉承泛在计算思想，面向泛在化计算资源管理，支持泛在应用开发运行，具有泛在感知、泛在互联、轻量计算、轻量认知、反馈控制、自然交互等新特征的新形态操作系统[13]。这种新形态操作系统在传统操作系统的“操作”和“管理”功能的基础上，支持资源虚拟化和异构资源抽象化。目前，操作系统的“碎片化”导致数字基础设施产生大量“软烟囱”“生态孤岛”“重复造轮子”等问题。开源作为当前软件开发的主流，成为泛在操作系统生态建设的重要手段。当前，学界和业界针对泛在操作系统开源生态的构建，进行了大量研究和实践活动。综合现有研究，本文认为，泛在操作系统开源生态是指在万物互联的开放创新环境下，以泛在操作系统为核心导向，借助相关平台，汇聚大量利益相关者，以吸引外部创新思想，适应差异化需求，支持泛在操作系统的持续迭代创新为目标，形成的各主体间良好协作、资源聚合的开源生态。

2.2 泛在操作系统开源生态构成要素

泛在操作系统是能运行在“万物”上的操作系统，旨在把万物有机地互联起来。在这样一个“人-机-物”互联形成的新型网络环境下，泛在操作系统开源生态的构建涉及众多主体之间的互动，各要素的参

与，以及发展环境与资源之间的相互协调，并非一个简单和孤立的过程。泛在操作系统开源生态由主体要素、环境要素和资源要素构成。

泛在操作系统开源生态的主体要素包括：开源基金会、产业联盟组织、源代码捐赠者、开发者（设备开发者和应用开发者）、用户、开源运营者等。开源生态的构建并非市场中无序的自发性行为，需要相关主体要素进行主导和牵引。其中，开源基金会和产业联盟组织作为开源社区的组织者和重大开源项目的推动者，主导着开源生态的发展。源代码捐赠者是开源项目的主要发起者，推动开源生态建设。开发者是开源生态的动力支持者和开源项目的知识生产者。泛在操作系统开源生态的开发者一般分为设备开发者和应用开发者：设备开发者根据设备的资源能力和业务特征进行灵活裁剪，满足不同形态的终端设备对于操作系统的要求；应用开发者主要聚焦上层业务逻辑、便捷开发应用程序。用户作为开源项目的使用者，在需求调研、用户体验和项目改进反馈等工作上具有至关重要的作用[14]。开源运营者是建立开源社区的积极行动者，他们不仅负责开源社区和开源项目的运营及维护，还帮助开源社区建立共同愿景、制定社区路线图、鼓励新贡献者的加入。

泛在操作系统开源生态的环境要素指与整个系统的运营与发展密切相关的要素，旨在保障开源生态健康运行，主要包含文化氛围、协作程度和制度保障等。开源是一种透明、协作、彼此尊重、相互沟通的文化，这也是开源社区的要义所在。协作共享是打破操作系统“孤岛化”的关键方法，也能增强社区参与者的归属感信任感，促进开发者和用户在开源社区共同探讨、思想碰撞。泛在操作系统开源在产业化应用中还需制度保障。在开源过程中，加强知识产权保护、建立开源许可合规体系、完善贡献者等级制度等对构建健康的开源生态至关重要。

泛在操作系统开源生态的资源要素助力开发者和用户参与贡献，主要分为云计算资源、文档资料、操作系统源代码和生态服务平台等类型。无时不在、无处不在的云计算资源是开源生态生长的“土壤”，能为开源生态中的各类应用提供可扩展的计算资源、存储资源等。文档资料，又被称为开发者文档，是泛在操作系统开发使用和维护过程中不可或缺的资料，也是开发者创新最为直接和有效的参考资源。文档资料既可以是成型的理念和观点，也可以是代码开发的实践过程，可以为开发者提供所需的开发指南、应用接口参考、示例教程等资源。操作系统源代码是一组由字符、符号或码元以离散形式表示信息的源文件，具有通用性、可扩充性和可识别性等特征，是开源生态建构的“核心”。泛在操作系统开源生态还需要有一个互联互通的生态服务平台，以此提供一站式服务，帮助开发者和用户快速、灵活地按自身业务需求定制操作系统。

2.3 泛在操作系统开源生态系统模型

泛在操作系统开源生态系统以源代码捐赠者为起点，形成源代码捐赠者—开发者—开源项目—用户的上下游关系。这种关联关系以开源项目为核心，形成供应链网络，可简述为：源代码捐赠者提交代码；开发者基于开源代码进行软件开发或硬件设备开发，以产品或服务的形式为用户提供方案；用户下载、体验所开发的项目并反馈信息；开发者根据用户的需求和反馈，不断完善或定制多样性的泛在操作系统，最终形成一个复杂交互的供应链关系网络。

因此，本文结合泛在操作系统开源生态的构成要素及其供应链网络关系，对泛在操作系统开源生态的结构和运行机理有更整体和系统的认识，初步构建泛在操作系统开源生态系统模型（图 1）。

从图 1 可以看出，在泛在操作系统开源生态系统中，主体要素持续地贡献和运营，构成了系统的主干网络；资源要素作为系统的动力和基础；环境要素构成系统的支撑和保障。各个要素之间有机结合，协同

共生，促使整个生态系统的平稳运转，最终实现系统效率和价值的最大化，使泛在操作系统真正地互联万物，被应用于全场景，赋能千行百业。

3 “三位一体”：泛在操作系统开源生态基础平台的构建方法

基于开源自主“根社区”，以代码托管平台和生态服务平台为依托构建基础设施，旨在实现海量物体的泛在感知、海量设备的泛在互联、海量数据的轻量计算、海量场景的自然交互、海量应用的开发搭建。

3.1 自主“根社区”

开源是泛在操作系统创新的关键手段，社区是开源的“根”。在自主创新的大背景下，显然这个“根”应该立足于本土，才能筑牢我国泛在操作系统开源生态的基础[①]。目前，国产操作系统基础研发投入不足，技术创新力不够，过多依赖国外上游开源社区，为了激发国产操作系统活力，我们需要构建中国自主统一的开源“根社区”，形成创新合力，从分散进攻变成凝聚力量攻关。

*（1）以开源基金会为指导，搭好“联接桥”。*开源基金会作为重大开源项目的推动者和开源社区的组织者，主导着开源生态的发展，我国开源基金会亟待管理制度和理念的创新支持。开源基金会主要为开源事业的健康有序发展提供顶层设计和配套服务。*在顶层设计上，*开源基金会应明确沟通机制和贡献机制，建立统一的行为准则为开源社区的健康有序发展提供指导。*在配套服务方面，*开源基金会发掘更多优秀开源项目和人才，打造开源开放框架，为泛在操作系统的开源提供开源战略咨询、法务咨询、项目运营、品牌营销、学术交流、国际合作、培训教育等服务。

*（2）建立“根社区”需要培育有吸引力的开源产品，紧跟技术趋势。*开源产品的技术优越性是衡量一个社区在全球开源生态话语权的重要指标，也是开发者和用户选择开源的最主要动因。因此，需要从技术先进性和技术吸引力出发来运营社区。一方面，泛在操作系统开源项目以软件定义技术，在项目开发时应扭住“牛鼻子”，突出原始创新，实现基础资源虚拟化和管理功能可编程，构建核心基础能力。另一方面，注重技术的安全、品质和可扩展性功能等，并通过包装、品牌推广或口碑推荐吸引更多高效率的开发

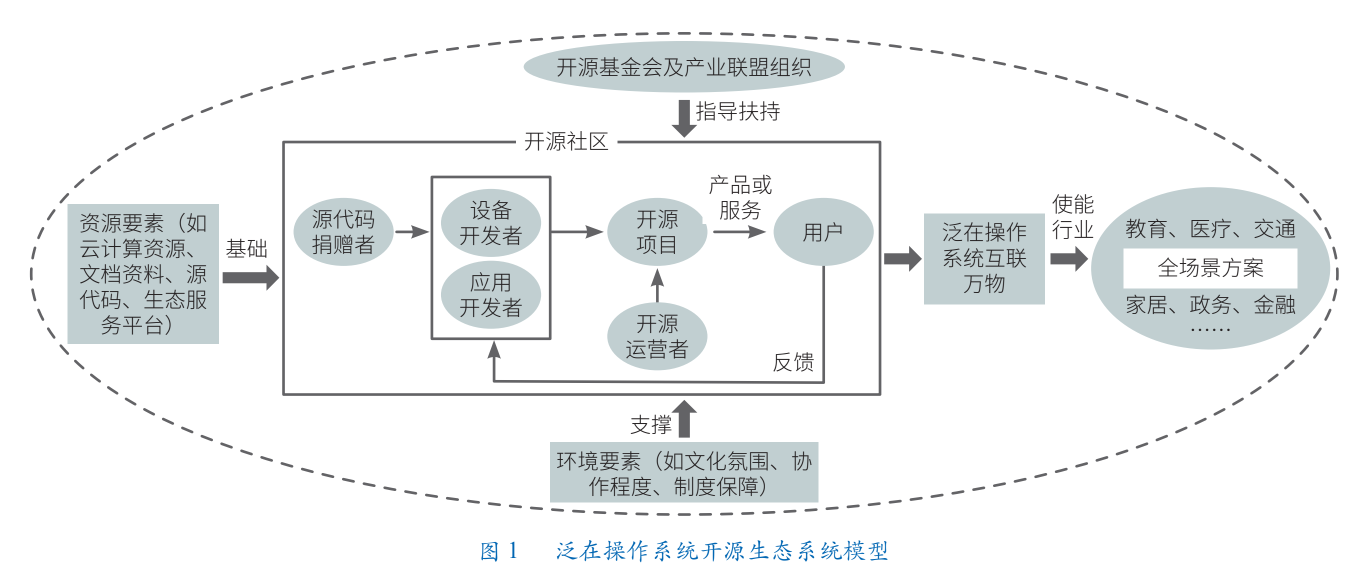


图 1　泛在操作系统开源生态系统模型

Figure 1　Model of ubiquitous operating system open source ecosystem

① 闫跃龙. 仅用一年即成中国最具活力的开源社区，openEuler 何以破局 ?. (2020-12-25)[2022-5-10]. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1687044259794816622&wfr=spider&for=pc.

者和数量庞大的用户群。从这个角度来说，中国庞大的人口与市场正是泛在操作系统最好的开源生态“孵化器”，泛在操作系统相关的产品可以被想象与应用，并开垦出适合我国“根社区”成长的生态土壤。

3.2 代码托管平台

代码托管平台既是开源代码的“托身”之所，也是开源活动（如技术讨论、思维碰撞、代码提交）的聚集之地。作为开源项目迭代演化的历史见证者，代码托管平台得益于码云（Gitee）分布式的特性；其使得多个开发者之间可以同步远程操控代码托管平台上的仓库，对维系开发者黏度有着无可比拟的重要性，是开源生态建设的重要方面[15]。一方面，代码托管平台以第三方及中立者身份提供开源代码托管服务，对代码审查、使用、修改、存储和删除等实行全生命周期管理。代码托管平台应具有更大的开放性和包容性，为开发者及用户提供良好的协作平台和项目孵化环境。另一方面，以提升开发效率为导向打造开源代码托管平台。抓住当前新兴领域内软件开发过程中影响开发效率的关键问题，打造与国际开源代码托管平台相比服务差异化的开源代码托管平台。通过商业化的战略经费补贴，推进代码托管平台在技术和运行模式上的不断改进。并以实际利益驱动国内龙头企业、新兴领域专业企业将自身高价值开源代码托管于平台。

3.3 万物互联的生态服务平台

长期以来，我国开源生态平台服务割裂，缺乏平台化、智能化和工具化能力。尤其是针对不同的操作系统做兼容性验证存在测试效率低、算力成本高等问题。基于万物互联网的泛在操作系统涵盖海量的物体、设备、数据、场景和应用，开发搭建海量对象之间相互连接而成的巨复杂网络系统，必须有一个一体化和一站式支撑服务平台体系；只有这样才能更好地实现“互联互通”和“全连接”，有效提高泛在操作系统开发创新的效率。

泛在操作系统开源生态的服务平台体系应从应用、系统软件和硬件开发方面进行构建，具体包括全场景应用的完整平台工具链、技术服务、兼容性测评服务和隐私安全机制等方面。华为移动服务平台（HMS）搭建的“连接一切”的传播网络，能为我国泛在操作系统开源生态服务平台的构建提供借鉴和支持。① HMS 支持“1+8+N”全场景设备应用。HMS 能为鸿蒙操作系统开发者提供可以实现“一次开发、多端部署”的高效开发工具，包括用户程序框架、能力框架、用户界面框架及多设备多语言翻译的方舟编译器，帮助鸿蒙操作系统部署在智能手表、智慧屏、车载设备和智能手机等各类智能终端上，形成一个跨终端应用的融合共享生态。② 开放分布式技术助力硬件开发，提升公共通信平台、分布式数据管理、分布式能力调度和虚拟外设四大能力。③ 注重合作伙伴的使用体验和隐私安全。万物互联导致系统前所未有的开放，系统的可靠性和安全性面临空前的挑战。HMS 提供兼容性测评服务，实现全局端云数据保护，确保运行在鸿蒙操作系统上的设备和业务应用能稳定、正常运行。

4 “企业主导到产业共建”：泛在操作系统开源生态持续演化方法

可持续性是泛在操作系统开源生态一个重要特点[16,17]。本文拟从“人-机-物”三元融合视角出发，提出泛在操作系统开源生态持续健康演化的方法，包括协作机制、激励机制、保障机制和信任机制[18]。

4.1 协作机制

开源的核心思想是通过互联网汇聚和联接大规模的志愿参与者，借助群体智慧的力量，通过协作完成单独依靠个人或者计算机难以完成的任务[19]。

泛在操作系统开源离不开群体协作，在群体化开发环境中，协作机制一般通过组织协同模式实现[20]。组织协同模式是一种高效的群体间协作方式，分为强

组织和弱组织2种机制。强组织机制适合闭源模式，能保证开发质量的进度，但限制了个体主观能动性；弱组织机制在当前互联网环境下较为流行，利于激发创造力，但较为松散，不利于整体目标的推进和实现。泛在操作系统开源生态的构建要协同强组织机制和弱组织机制，既需要充分发挥每个贡献者个体的主观能动性，也需要对参与团体进行一定的约束和引导，以实现群体智能涌现。

*建设我国自主的泛在操作系统开源生态必须同时坚持开放和治理的原则。① 开源基金会负责泛在操作系统源代码的孵化和运维。*吸引大量主流厂商、科研院所和开发者的加入，形成"创新联合体"和"去中心化"的开放群体参与组织结构，逐步扩大泛在操作系统开源生态"朋友圈"。*② 建立开源项目群组织架构，成立开源项目群工作委员会。*工作委员会是开源项目群的最高决策机构，负责开源项目社区的治理工作。这些举措既具有约束性，又开放开源，实现强组织机制与弱组织机制的有机融合，有效确保泛在操作系统开源生态的可持续发展。

4.2 激励机制

激励机制的概念大多来自行为经济学与新制度主义的相关研究。这些研究认为，个体的行为动机是多样的，主要受3种激励机制的影响：基于社会地位认可的激励机制（如声誉、会员等级等），基于收入与分配的物质激励机制，以及基于情感需求的激励机制[21]。这3种激励机制相互促进，产生协同效应。

*泛在操作系统开源中的激励机制应以声誉机制为主。*例如，在开放原子开源基金会中，参与者根据贡献的程度划分不同等级（如白金捐赠人、黄金捐赠人和白银捐赠人等），并根据其等级享有特定的权利和义务，从而激励参与者积极贡献以获得更高等级的知识产权共享权和决策权。华为公司更是推出三大激励计划，即"大使计划""布道师计划"和"开源贡献者计划"，以吸引更多有梦想的开发者参与OpenHarmony生态共建。

*在物质激励机制的设计中，要推动建立市场化开源人才薪酬机制。*物质激励的额度设定会对参与者的多少，以及任务完成质量产生很大的影响[22]。因此，要优化调整现有制度中对开源人才的薪酬限制，让优秀的开源人才得到合理回报。例如，在亚马逊公司的服务器网站Mechanical Turk平台，任务发布者给每个任务设定相应的标价，完成任务的参与者能够获得相应的奖金，从而释放开源人才创新活力[23]。同时，还可以实施开源项目的股权激励政策和专项激励计划，全力扶持开发者创新，助力泛在操作系统走向全球。

*基于情感需求的激励机制是吸引个体开发者持续参与贡献的重要手段。*情感激励主要包括"解决诉求""个人成长""正向激励"和"生态推广"4个方面[24]。个体开发者在开源中解决个人诉求，提升个人竞争力，获得正向激励，还可以实现个人成果的生态推广，如增加交友的机会、提高成就感与自信等[25]。基于此，开源社区或者开源企业应积极搭建交流展示平台，激励个体开发者不断反哺开源。例如，举办"开发者大赛""开源峰会"，定期开展"知识交流讲座"，颁发"布道师荣誉证书"等，以吸引更多的个体开发者参与贡献。

4.3 保障机制

泛在操作系统开源生态的保障机制旨在保证泛在操作系统持续迭代创新目标的顺利实现，主要包括技术保障、政策保障和人才保障。

*（1）技术保障为泛在操作系统开源生态提供丰富的功能支持，提高开源项目开发的效率。*在泛在操作系统开源生态中，常用的技术工具主要有编译器、代码迁移工具、云测工具等。*编译器，*支持跨终端设备平台，能够将不同语言代码编译成一套可执行文件，突破设备和语言限制，降低跨语言解释开销。*代码迁移工具，*可自动扫描待迁移软件进行源码分析，并提供可迁移性评估及建议的可视化分析；能实现部分代

码的一键自动替换或修改，能降低排查困难、反复调试定位的难度，提升迁移效率。云测工具，面向开发者提供基于社区平台的兼容性测试、稳定性测试、安全测试、功耗测试、性能测试服务功能，帮助快速识别和定位应用程序在运行阶段的问题。

（2）泛在操作系统开源生态的发展离不开政策法规的引导和支持。在国家各项的政策号召下，操作系统开源已经成为发展潮流。2021—2022 年发布的《知识产权强国建设纲要和“十四五”规划实施年度推进计划》《国务院关于印发“十四五”数字经济发展规划的通知》《工业和信息化部关于印发“十四五”软件和信息技术服务业发展规划的通知》等相关政策，都明确提出要基于开源的创新模式，大力发展操作系统等软件核心技术的研发，加快构建我国自主的未来数字基础设施的底座。2021 年 9 月，国家自然科学基金委员会还发布“泛在操作系统及生态构建研究”专项项目，大力推进操作系统研发及其生态构建的新理论及其软件定义新方法。由于国家和产学研各界的高度重视和支持，我国泛在计算场景下操作系统持续迭代创新及其生态良好发展的态势正在形成。当前，政府应关注我国软件开发短板，多措并举培育健康可持续发展的泛在操作系统开源生态。① 完善泛在操作系统开源共享的政策体系。在贯彻落实“十四五”规划提出的一系列政策基础上，积极完善开源相关法规和社区治理规则等。② 引导多元主体参与整合泛在操作系统开源生态资源。支持不同行业领域布局泛在操作系统开源项目，打通行业壁垒。同时，可拨付试点资金或提供政策“绿灯”，有效指引开源基金会、企业和开发者等共建共治，加速实现生态融合。③ 积极防范开源风险。围绕泛在操作系统项目，制定设计全生命周期的风险管理和审计标准，提高开源代码的安全性。

（3）人才是保障机制运行最关键的要素。泛在操作系统开源生态对人才的国际化水平、复合型背景和专业水平要求较高，要完善系统的人才储备和培养模式。① 培养开源领军人才，加大对国外开源专业人才的引进力度，逐步缩小国内外开源人才在数量、质量上的差距。中国操作系统等基础软件的人才瓶颈问题突出，国内人才缺口持续拉大，高端复合型人才严重不足。泛在操作系统开源生态构建应聚焦开源前沿课题，推动国际人才交流和技术交流，吸引和培养具备国际视野的开源软件人才。② 加强开源生态构建所需的复合型人才培养。以泛在操作系统为导向，为产业内专业技术人才与生态运营人才创造更多合作空间与协同机会。同时，针对开发者职业类别、技术程度、能力阶段等多个维度，开设多主题多深度的系列课程，为开发者搭建阶梯式学习体系。③ 围绕泛在操作系统的基本原理、机理及构造方法学等方面，实施人才专项培养计划，以突破泛在操作系统在编程模型、内核创新、端边云多场景和安全可信方面的瓶颈，促进泛在操作系统开源生态蓬勃发展。基于此，开源基金会应积极联合头部科技企业和操作系统科研实力强劲的科研院所，成立更加精细化的创新联合体。例如，华为公司联合开放原子开源基金会推出“开源雨林”、高校人才培育等计划，为泛在操作系统开源生态发展提供有力的人才保障。

4.4 信任机制

开源项目的持续迭代创新建立在社区开发者互信的基础上。不同于传统社区，泛在操作系统开源社区是一种开放式的在线交流社区，社区参与者间缺乏面对面的交流，难以形成相对稳固的互信关系。因此，泛在操作系统开源生态的信任机制解决的不是参与者间的互信关系，而更应该侧重构建一个可信、公平公正的开发环境，以有效打消开发者和用户参与的顾虑。

（1）加强开源许可合规管理。开源许可证是开源生态的基石，对开源软件的使用、复制、修改和分发等行为进行规范和约束，具有法律效力。中国在 2019 年

的“柚子案”和“不乱买案”中认可了通用公共许可证（GPL）的法律效力。相关判例的产生，意味着开源许可证不再是君子协定，违反开源许可证会带来授权终止并构成著作权侵权等法律风险问题。基于此，开源基金会可针对泛在操作系统开源项目的开源许可进行合规审查，建立开源项目全生命周期的风险管控机制，对开源项目的引入、使用、孵化和退出的全流程管理做出流程规范，落实各环节的主体责任。

（2）加强开源代码的知识产权管理，为开源生态健康运行保驾护航。开源代码的知识产权是开源社区的“屏障”；如果知识产权出现问题，将给开源生态带来巨大风险。泛在操作系统开源代码的授权使用需遵守相应的开源协议，而在围绕开源项目进行知识创造和应用发展过程中，存在知识产权注册不及时、知识产权权属界定不清晰、知识产权共享规则不健全、知识产权侵权等问题。针对这些问题，开源社区要采取相关措施保障社区环境健康发展，促进开发者和用户间的有效协同。① 开源社区要开展泛在操作系统开源知识产权保护培训，从而提高开发者知识产权保护意识，加强开源企业知识产权保护的重视程度。② 开源社区实施开源知识产权全流程管控，建立健全产业知识产权侵权监控机制和风险应对机制，加强开源领域软硬件知识产权及商标管理。③ 由于泛在操作系统相关研究的多样化，在开发创新过程产生差异化的开源项目，可能会涉及不同的知识产权问题，这就需要开源社区推动产业联盟共同构建知识产权联盟，成立泛在操作系统专项“专利池”，在保障泛在操作系统知识产权的同时，做到不侵权也不被侵权。

（3）坚持共建、共治、共享的商业模式，促进开发者和用户之间的沟通和深入协作。不管是开源企业还是开源组织，都可以通过主动开源进行多元化的商业布局。参考谷歌、红帽等公司成熟的开源商业模式，如推出开源版本和商业许可版本、对孵化产品或附加功能收费、提供有偿知识服务和开源项目托管服务等，可使得泛在操作系统开源在保持理想主义的同时，形成自循环、自保障的发展机制。此外，以国内龙头企业开源技术或自主创新的操作系统为基础，形成上下游协同的战略联盟，积极跟进面向万物互联的泛在操作系统，参与未来数字基础设施建设，共建具有竞争力的商业生态体系。随着合作共赢的商业模式不断发展，开放式创新的互信环境不断稳固，泛在操作系统开源生态逐渐呈现一个良好的发展氛围。

5 结论与建议

基于万物互联网构建泛在操作系统开源生态是推进操作系统迭代创新的一种必然趋势，而构建泛在操作系统开源生态需要万物互联网环境的有力支撑。本文构建了泛在操作系统开源生态系统模型，提出泛在操作系统开源生态的构建基础，进而阐述了实现开源生态持续健康演化的路径方法，这对于促进泛在操作系统发展与维护泛在操作系统开源生态的健康运行都具有重要意义。

泛在操作系统开源生态作为一个巨复杂适应性生态系统，需要多利益相关方坚持共建、共治、共享的开源理念，制定具有前瞻性的开源开放策略。基于此，提出 3 点建议：① 制定中长期发展战略路线。泛在操作系统开源生态的构建是一个持续的过程，多利益相关方（如政府、开源基金会及产业联盟）需面向万物互联和泛在计算环境，制定契合自身发展条件的发展路线图，掌握泛在操作系统创新和应用的主动权。② 借鉴国际先进经验。针对“人-机-物”融合带来的边界开放、资源异构，以及生态构建等不确定性难题，深入加强国际交流合作；通过与国际规则体系接轨，提前布局我国在泛在操作系统开源生态的主导权。③ 完善开源生态治理机制。集中关注泛在操作系统开源生态构建问题，分析泛在操作系统开源生态的运行机理和供应链安全风险，完善供应链安全风险源识别、评估体系和预警模型。

参考文献

1 Mei H, Guo Y. Operating systems for internetware: Challenges and future directions// 2018 IEEE 38th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). Vienna: IEEE, 2018: 1377-1384.

2 Weiser M. The computer for the 21st century. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 1999, 3(3): 3-11.

3 黄鹏, 李宏宽. 中国开源软件生态构建的风险及对策. 科技导报, 2021, 39(2): 83-95.
Huang P, Li H K. Risks and countermeasures of China's open source software ecosystem construction. Science & Technology Review, 2021, 39(2): 83-95. (in Chinese)

4 van den Berk I, Jansen S, Luinenburg L. Software ecosystems: A software ecosystem strategy assessment model// Proceedings of the Fourth European Conference on Software Architecture: Companion Volume. New York: Association for Computing Machinery, 2010: 127-134.

5 Liu Z M, Wang J. Human-cyber-physical systems: Concepts, challenges, and research opportunities. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2020, 21(11): 1535-1553.

6 陈硕颖, 杨扬. 我国基础软硬件产业的"生态"瓶颈及突破. 经济纵横, 2018, (11): 103-110.
Chen S Y, Yang Y. The bottleneck of the network ecology of China's basic software & hardware industry and its breakthrough. Economic Review Journal, 2018, (11): 103-110. (in Chinese)

7 Cao D G, Xue D L, Ma Z Y, et al. XiUOS: An open-source ubiquitous operating system for industrial Internet of Things. Science China Information Sciences, 2022, 65(1): 117101.

8 范昊, 郑小川. 国内外开源情报研究综述. 情报理论与实践, 2021, 44(10): 185-192.
Fan H, Zheng X C. A review of the research on open source intelligence at home and broad. Information Studies: Theory & Application, 2021, 44(10): 185-192. (in Chinese)

9 Jansen S. A focus area maturity model for software ecosystem governance. Information and Software Technology, 2020, 118: 106219.

10 王节祥, 陈威如, 江诗松, 等. 平台生态系统中的参与者战略：互补与依赖关系的解耦. 管理世界, 2021, 37(2): 126-147.
Wang J X, Chen W R, Jiang S S, et al. Strategies for complementors in platform-based ecosystem: The decoupling of complementarity and dependence. Journal of Management World, 2021, 37(2): 126-147. (in Chinese)

11 金芝, 周明辉, 张宇霞. 开源软件与开源软件生态：现状与趋势. 科技导报, 2016, 34(14): 42-48.
Jin Z, Zhou M H, Zhang Y X. Open source software and its eco-systems: Today and tommorow. Science & Technology Review, 2016, 34(14): 42-48. (in Chinese)

12 Martino B, Li K C, Yang L T, et al. Internet of everything: algorithms, methodologies, technologies and perspectives. Springer, 2017: 1-3.

13 梅宏, 曹东刚, 谢涛. 泛在操作系统：面向人机物融合泛在计算的新蓝海. 中国科学院院刊, 2022, 37(1): 30-37.
Mei H, Cao D G, Xie T. Ubiquitous operating system: Toward the blue ocean of human-cyber-physical ternary ubiquitous computing. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(1): 30-37. (in Chinese)

14 张克永. 开放式创新社区知识共享研究. 长春：吉林大学, 2017.
Zhang K Y. Research on Knowledge Sharing in Open Innovation Community. Changchun: Jilin University, 2017.

15 隆云滔, 王晓明, 顾荣, 等. 国际开源发展经验及其对我国开源创新体系建设的启示. 中国科学院院刊, 2021, 36(12): 1497-1505.
Long Y T, Wang X M, Gu R, et al. Development experience of international open source and its enlightenment to construction of open source innovation system in China. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(12): 1497-1505. (in Chinese)

16 Dhungana D, Groher I, Schludermann E, et al. Software ecosystems vs. natural ecosystems: Learning from the ingenious mind of nature// Proceedings of the Fourth European Conference on Software Architecture: Companion Volume. New York: Association for Computing Machinery, 2010: 96-102.

17 Manikas K, Hansen K M. Software ecosystems—A systematic literature review. Journal of Systems and Software, 2013, 86(5): 1294-1306.

18 吕一博, 蓝清, 韩少杰. 开放式创新生态系统的成长基因——基于iOS、Android和Symbian的多案例研究. 中国工业经济, 2015, (5): 148-160.
Lyu Y B, Lan Q, Han S J. Growth genes of the open innovation ecosystem—Multi-case study based on iOS, Android and Symbian. China Industrial Economics, 2015, (5): 148-160. (in Chinese)

19 Sindlinger T S. Crowdsourcing: Why the power of the crowd is driving the future of business. American Journal of Health-System Pharmacy, 2010, 67(18): 1565-1566.

20 王涛, 尹刚, 余跃, 等. 基于群智的软件开发群体化方法与实践. 中国科学：信息科学, 2020, 50(3): 318-334.
Wang T, Yin G, Yu Y, et al. Crowd-intelligence-based software development method and practices. Scientia Sinica (Informationis), 2020, 50(3): 318-334. (in Chinese)

21 Fehr E, Fischbacher U. Why social preferences matter—The impact of non-selfish motives on competition, cooperation and incentives. The Economic Journal, 2002, 112: C1-C33.

22 Mason W, Watts D J. Financial incentives and the “performance of crowds”// Proceedings of the ACM SIGKDD Workshop on Human Computation. New York: Association for Computing Machinery, 2010: 77-85.

23 Heer J, Bostock M. Crowdsourcing graphical perception: Using mechanical turk to assess visualization design// Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: Association for Computing Machinery, 2010: 203-212.

24 Mizushima K, Ikawa Y. A structure of co-creation in an open source software ecosystem: A case study of the eclipse community 2011// Proceedings of PICMET 11: Technology Management in the Energy Smart World (PICMET). Portland: IEEE, 2011: 1-8.

25 张伟, 梅宏. 基于互联网群体智能的软件开发：可行性、现状与挑战. 中国科学：信息科学, 2017, 47(12): 1601-1622.
Zhang W, Mei H. Software development based on collective intelligence on the Internet: Feasibility, state-of-the-practice, and challenges. Scientia Sinica (Informationis), 2017, 47(12): 1601-1622. (in Chinese)

Research on Construction Method of Ubiquitous Operating System Open Source Ecosystem Based on Internet of Everything

WANG Meng　LI Weidong*

(School of Journalism and Information Communication, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract　Building an independent, healthy, and sustainable open source ecosystem is a key link in the development and application of ubiquitous operating system. Aiming at the Internet of Everything, combined with the new characteristics of ubiquitous operating system, this study summarizes the constituent elements and system model of ubiquitous operating system open source ecosystem, and puts forward the construction method of ubiquitous operating system open source ecosystem. This study provides new ideas to promote the iterative innovation of ubiquitous operating system, integrate the isolated island of ubiquitous operating system open source ecosystem, and promote the preliminary practice and collaborative development of ubiquitous operating system open source ecosystem.

Keywords　Internet of Everything, ubiquitous operating system, open source ecosystem, construction method

*Corresponding author

王 孟 华中科技大学新闻与信息传播学院博士研究生。主要研究领域：互联网管理、开源生态、科技与社会等。E-mail: yunaimeng@hust.edu.cn

WANG Meng Ph.D. student of School of Journalism and Information Communication, Huazhong University of Science and Technology. Her research focuses on Internet management, open source ecology, science & technology and society, etc. E-mail: yunaimeng@hust.edu.cn

李卫东 华中科技大学新闻与信息传播学院教授，国家认证计算机技术与软件技术专业"系统分析师"（高级工程师级），大数据与国家传播战略教育部哲学社会科学实验室执行主任，国家传播战略研究院执行院长。主要研究领域：互联网管理、数据治理、科技与社会等。E-mail: liweidong@hust.edu.cn

LI Weidong Professor of School of Journalism and Information Communication, Huazhong University of Science and Technology. He is also the System Analyst in computer technology and software technology with national certification, the Executive Director of PSS Lab of Big Data and National Communication Strategy as well as the Executive Director of the National Institute of Communication Strategy. His research focuses on Internet management, data governance, science & technology and society, etc. E-mail: liweidong@hust.edu.cn

■责任编辑：岳凌生